



ISSN:1306-3111

e-Journal of New World Sciences Academy
2010, Volume: 5, Number: 1, Article Number: 3A0019

PHYSICAL SCIENCES

Received: May 2009

Accepted: January 2010

Series : 3A

ISSN : 1308-7304

© 2010 www.newwsa.com

Berkay Camgöz

Mehmet N.Kumru

Ege University

berkay.camgoz@ege.edu.tr

ieinan@yahoo.com

Izmir-Turkey

**DÜŞÜK VE YÜKSEK ENERJİLİ GAMA IŞINLARININ MARUZ KALMA YIĞILMA
FAKTÖRLERİNİN ETKİN ATOM NUMARASINA BAĞIMLILIĞI**

ÖZET

Yığılma faktörlerinin (Buildup) Z_{eff} bağımlılığı, 200keV, 500keV, 1MeV, 5MeV, 10MeV ve 50MeV enerjili gama fotonları için, EGS4 Monte Carlo Kodu kullanılarak incelendi. Farklı Z_{eff} değerlerindeki metarrellerin elde edilmesi için Li, Cu, Fe ve Pb elementleri farklı oranlarda kullanılarak homojen karışımlar için Monte Carlo kodu geliştirilmiştir. Tüm EGS4 hesaplamaları iki boyutlu düzlem geometride gerçekleştirilmiştir. EGS4 tasarımının doğruluğunu kontrol etmek için Pb, Fe ve H₂O için yığılma faktörleri hesaplanmış ve basılmış literatür verisi ile uyumlu olduğu ortaya konmuştur. EGS4 hesaplamalarında maruz kalma, foton akısı ve hava için enerji soğurma katsayısı kullanılarak elde edilmiştir. Hesaplamalarda Rayleigh saçılmaları dikkate alınmış, bremstrahlung ve floresans ışınmaları ihmal edilmiş olup tüm hesaplamalar üstel transform kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elde edilen veri seti, yığılma faktörlerinin Z atom numarası ile birlikte düzgün artış gösterdiğini ortaya koymaktadır. Derin girişkenlik miktarlarında yığılma faktörlerindeki değişkenlik hızla artış göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: EGS4, Buildup, Monte Carlo, Etkin Z, Enerji

**DEPENDENCE OF Z_{eff} FOR THE EXPOSURE BUILDUP FACTORS OF LOW AND HIGH
ENERGIES OF GAMMA RAYS**

ABSTRACT

The Z_{eff} dependence of exposure buildup factors for plane incident source gamma rays of 200keV, 500keV, 1MeV, 5MeV, 10MeV and 50MeV have been investigated by using electron gamma shower Monte Carlo code, EGS4. To prepare materials with different Z_{eff} , homogen mixtures composed of Li, Cu, Fe and Pb were used in different ratios. All the EGS4 calculations were performed in two dimensional plane geometry for each mixture. To check the accuracy of EGS4 calculations, an extra work has been performed for the exposure buildup factors of Pb, Fe and H₂O. Results of these calculations are agreed well with the published data. In the EGS4 calculations, the exposure was obtained from the photon flux and the energy absorption coefficient of air. The effect of Rayleigh scattering was included but effects of bremstrahlung and fluorescent radiation were not taken into account. All calculations were performed with the exponential transform. The calculated data showed that buildup factors vary smoothly with increasing Z. At deep penetration depths, variation of buildup factors has more rapid variation.

Keywords: EGS4, Buildup, Monte Carlo, Effective Z, Energy

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Yığılma faktörü; ortamdan radyasyon geçişi sırasında belirli bir konumdaki radyasyon miktarının bu konuma etkileşmeden gelen radyasyon miktarına oranı olarak tanımlanabilir. Yığılma faktörü etkileşim derinliğinin yani ortalama serbest yolun fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. (Ortalama serbest yol lineer uzaklıkla değişmektedir, birim ortalama serbest yol maddesel ortamın soğurma katsayısına

bağlıdır ve lineer bir değere karşılık gelir. $\frac{I}{I_0} = B(t, E).e^{-\mu t}$ (1)

I: soğurulmadan geçen foton şiddeti

I_0 : yayımlanan toplam foton şiddeti

B(t,E): Yığılma faktörü; t soğurucu kalınlığı ve E radyasyonun enerjisi

Yığılma faktörleri gama radyasyonu zırhlama tasarımında pratik uygulamalar için her zaman kullanışlı olmuştur. Zırhlamada kullanılan malzeme, standart bir yığılma faktörü verisine sahip olmayan elementlerden, karışımlardan ya da bileşiklerden meydana gelmektedir. Bu da, birbirinden farklı yaklaşım tekniği uygulayan, foton transportu analizi yapan bilgisayar simülasyonlarının ürettiği yığılma faktörleri verileri arasında bir uyumsuzluğa neden olmaktadır. Bu nedenle uygun bir veri ile yığılma faktörünün belirlenmesi çok önemlidir.

Literatürde, yığılma faktörü doğrudan hesaplanmamış elementler için interpolasyon yapan pek çok ampirik formül önerilmektedir. Örneğin Taylor'a ait formül[1] üç parametrelili üstel (logaritmik) azalma fonksiyonu içermektedir ve bu formülasyon yüksek Z (atom numarası) değerleri için daha iyi bir interpolasyon sağlamaktadır(2).

$$B(E, x) = A \exp(-\alpha_1(E)x) + (1 - A) \exp(-\alpha_2(E)x) \quad (2)$$

Berger'in formülasyonunda[2] ise iki terim bulunmaktadır. Malzeme ile etkileşime girmeyen fotonların katkısını birinci terim, saçılan fotonların katkısını ikinci terim belirlemektedir(3).

$$B(E, x) = 1 + C(E)x \exp(-D(E)x) \quad (3)$$

Polinom formül[3] 20mfp ortalama serbest yol uzunluğuna kadar kabul edilebilir bir sonuç vermektedir(4).

$$B(E, x) = \sum_{n=0}^3 \beta_n(E)(x)^n \quad (4)$$

Bu üç formülasyona ilave olarak pek çok interpolasyon formülü de mevcuttur ve uygulamalarda kullanılmaktadır. Bu formüllerdeki parametrelere ait değerler deneysel olarak çok az malzeme için elde edilmektedir. Bu nedenle gama ışını yığılma faktörlerinin düşük Z değerli materyallerden, yüksek Z değerli materyallere kadar olan geniş bir aralıkta, ortamın etkin atom numarası ile değişimine yönelik hesaplamaların yer aldığı bir veri tabanına büyük ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada maruz kalma yığılma faktörlerinin atom numarasına bağlı ve genellenmiş olarak elde edilmesi amaçlanmıştır. Hesaplamalarda gama radyasyon kaynağı düzlem geometrideki soğurucu materyalin dik eksenine üzerine konumlandırılmıştır. Maruz kalma yığılma faktörü havanın enerji soğurma cevabına bağlıdır, maruz kalma hava içinde absorbe edilen dozun perturbe olmamış bir dedektör tarafınan ölçülen değerine eşdeğer kabul edilmektedir.

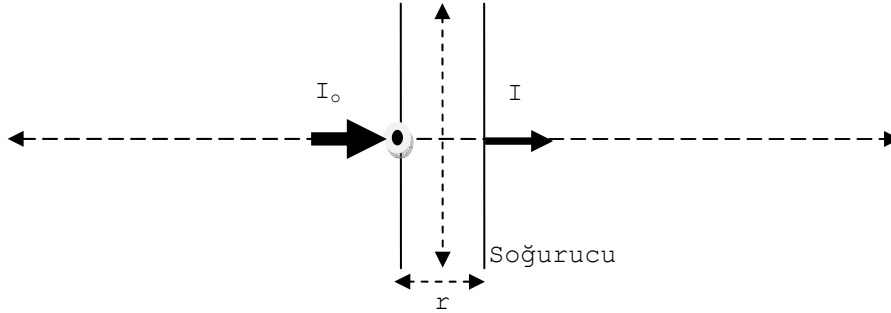
2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Yığılma faktörleri zırhlama ve radyasyon ölçümü çalışmalarında belirleyici niceliktir. Radyasyon-madde etkileşimleri bakımından gama radyasyonunun soğurulması, radyasyonun başlangıç enerjisine ve soğurucu ortamın atom numarasına doğrudan bağlıdır. Bu durum yığılma faktörlerinin atom numarasına bağımlılığına sebep olmaktadır. Tek elementten oluşan malzemeler için hesaplamalar, karışım ve bileşik halindeki malzemelere göre çok daha basittir. Soğurucu ortam element, bileşik veya karışım olabilir. Foton madde etkileşimlerinde tesir kesitler oldukça önemlidir ve atom numarası ile değişir. Her elementin bilinen bir atom numarası olmasına rağmen karışım ve bileşikler için atom numarasından bahsetmek mümkün değildir. Ancak bunlar için etkin atom numarası kavramı kullanılmaktadır.

Radyasyon akısının hassas olarak hesaplanması deney koşulları tarafından engellenmektedir. Çalışmada Monte Carlo simülasyonu yöntemi kullanılmıştır.

3. ANALİTİK ÇALIŞMA (ANALYSIS STUDY)

Bir maddesel ortamda foton taşıma simülasyonunda, genel elektromanyetik radyasyon taşınması için yazılmış olan EGS4 (Electron Gamma Shower) bilgisayar kodu kullanıldı[4]. Yarı sonsuz materyal geometrisi içinde 10mfp ortalama serbest yol büyüklüğüne kadar (mfp: radyasyonun ortamda iki etkileşim arasında aldığı yol; materyal cinsine ve radyasyon enerjisine bağlı olarak değişmektedir)yığılma faktörü verisi elde edildi. Soğurucu ortam kalınlığı 12mfp olarak belirlenmiştir.(Şekil 1).



Şekil 1. EGS4 Monte Carlo Simülasyonu geometrisi
(Figure 1. Geometry of EGS4 Monte carlo simulation)

Maruz kalma yığılma faktörü $B(E_0, x)$ aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (5).

$$B(E_0, x) = \frac{\int_0^{E_0} \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} (E) I(x, E) dE}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} (E_0) I(x, E_0)} \quad (5)$$

Bu denklemde, $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} (E)$ Enerji transfer katsayısı, ve $I(x, R)$, x konumundaki enerji akısıdır. (5)nolu denklem (6) nolu denklemdeki gibi yazılarak program içerisinde tanımlanmıştır. Böylece, integral çözmek

yerine hassas aralıklarda toplam alınarak çalışma süresi kısaltılmıştır.

$$B(E_0, x) = \frac{\sum \left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} (E) I(x, E)}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho} \right)_{air} (E_0) I(x, E_0)} \quad (6)$$

EGS4 hesaplamalarında maruz kalma foton akısı ve havanın enerji transfer katsayısı kullanılarak elde edilmiştir. Derin etkileşimlerde iyi bir istatistik sağlamak için tüm hesaplamalarda logaritmik üstel dönüşüm kullanıldı. İkincil elektronlar simülasyon süresinin azaltılması için ihmal edilmiştir. Yığılma faktörü foton akısına bağlı olduğundan bu elektronların hesaplamalarda etkisi bulunmamaktadır.

Düzlem materyal Kartezyen koordinatlarda orijine yerleştirilmiştir. $\mu_r = \{1, 5, 10\}$ koşulunu sağlayan değerlerde "r" düzlem kalınlıkları belirlenmiştir. μ , ortamın soğurma katsayısıdır ve ortalama serbest yolun tersidir(7). Genel soğurma formalizminde μ_r belirleyici faktördür(8).

$$\mu = \lambda^{-1} \quad (7)$$

$$I = B \cdot I_0 \cdot e^{-\mu r} \quad (8)$$

Çalışmamızda, simülasyon kurgusunun doğruluğunu kontrol etmek amacı ile yığılma faktörleri EGS4 kullanılarak, kurşun, demir ve su için 1 MeV enerjili gama ışınları için hesaplanmıştır. Elde edilen veriler, açısal Eigen Değeri Metodu (Angular Eigen Method: AEM) değerleri[5] ile karşılaştırıldı (Tablo 1-3). Bu çalışma ile AEM değerleri arasındaki küçük farklılıklar hesaplama geometrilerin farkından kaynaklanmaktadır. EGS4 sonuçlarının istatistikî hataları simülasyonun her defasında 10 tekrarı ve 10^6 foton kullanılması ile elde edildi.

Materyal Verisi ve Tesir Kesitler: PEGS4 programı ile materyeller için enerjiye bağlı tesir kesit tabloları oluşturulmuştur. Bu veri yeterince geniş enerji skalası içermektedir. Compton saçılmaları Klein-Nishina yaklaşımından, fotoelektrik etkileşim ve kohorent saçılmalara ait tesir kesitler Storm ve Israel [6] tarafından derlenen verilerden, hava için kütle enerji transferi katsayısı Hubbel'in[7] derlemesinden alınmıştır. PEGS4 entegre program kullanılarak farklı etkin atom numaraları

$$Z_{eff} = \frac{\sum_i \frac{w_i}{A_i} Z_i^2}{\sum_i \frac{w_i}{A_i} Z_i} \quad (9)$$

eşitliği kullanılarak Z_{eff} değerlerine sahip karışımlar için malzeme verisi hazırlanmıştır.

Burada w elementin karışım içindeki yüzde ağırlığı, A kütle numarası ve Z atom numarasıdır. Soğurma katsayıları da (10)nolu denklemi ile hesaplanmıştır.

$$\mu_{mixt} = \sum_i \mu_i w_i \quad (10)$$

Karışımlar hazırlanırken Pb, Fe, Cu ve Li elementlerinin farklı oranları kullanılmıştır. Ayrıca seçilen bu elementler metal olduklarından deneysel olarak da hazırlanmaları mümkündür. Kompozisyonlar ve etkin atom numaraları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Soğurucu malzemelerin karışım oranları ve etkin atom numaraları
(Table 1. Mixture ratios of elements and effective atomic numbers of absorbing materials)

Karışım Sırası	Z_{eff}	Elementlerin Oranları (%)			
		Li	Al	Cu	Pb
1	10	46	48	4	2
2	15	38	34	24	4
3	20	18	52	20	10
4	25	14	6	78	2
5	30	28	34	6	32
6	35	4	18	56	22
7	40	8	32	20	40
8	45	12	14	28	46
9	50	22	14	2	62
10	55	6	26	2	66
11	60	16	0	12	72
12	65	12	4	4	80
13	70	4	10	0	86

4. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND SUGGESTIONS)

Simulasyon tasarımını test etmek amacıyla çalışmanın kurşun, demir ve su için 1 MeV enerjili fotonlarla elde edilen verisi literatür ile karşılaştırıldı (Tablo 2-4). Çalışmada oluşturulan, etkin atom numaraları ile tanımlanmış karışımlar için $\mu_r=1,5,10$ derinliklerinde yığılma faktörleri hesaplanmıştır (Tablo 5-12).

Tablo 2. Kurşun malzemede 1MeV enerjili Gama-Radyasyonu için etkileşim derinliğine karşılık maruz kalma yığılma faktörleri
(Table 2. In lead material Exposure Buildup Factors versus penetration for 1MeV energetic Gamma rays)

Penetration (mfp)	EGS4 ^a	AEM ^b
0,5	1,2137 ± 0,0004	-
1	1,3856 ± 0,0004	1,37
2	1,6831 ± 0,0008	1,67
3	1,9442 ± 0,0012	1,95
4	2,1828 ± 0,0023	2,20
5	2,4052 ± 0,0030	2,44
6	2,6173 ± 0,0037	2,68
7	2,8250 ± 0,0054	-
8	3,0247 ± 0,0062	3,11
10	3,3984 ± 0,0177	3,52

a: This study (For Plane Normally Incident Source).

b: AEM Data (For Point Isotropic Source) [5].

Tablo 3. Su malzemede 1MeV enerjili Gama-Radyasyonu için etkileşim derinliğine karşılık maruz kalma yığılma faktörleri
(Table 3. In water material Exposure Buildup Factors versus penetration for 1MeV enerjetis Gamma rays)

Penetration (mfp)	EGS4	AEM
0,5	1,5121 ± 0,0003	-
1	2,1478 ± 0,0009	2,07
2	3,7692 ± 0,0014	3,61
3	5,8318 ± 0,0052	5,51
4	8,3087 ± 0,0113	7,71
5	11,155 ± 0,0255	10,2
6	14,319 ± 0,0241	12,9
7	17,794 ± 0,0411	-
8	21,534 ± 0,0923	19,1
10	30,068 ± 0,1382	26,2

Tablo 4. Demir malzemede 1MeV enerjili Gama-Radyasyonu için etkileşim derinliğine karşılık maruz kalma yığılma faktörleri
(Table 4. In iron material Exposure Buildup Factors versus penetration for 1MeV enerjetis Gamma rays)

Penetration (mfp)	EGS4	AEM
0,5	1,4070 ± 0,0006	
1	1,8324 ± 0,0007	1,85
2	2,7634 ± 0,0020	2,86
3	3,8036 ± 0,0026	4,01
4	4,9520 ± 0,0045	5,32
5	6,1906 ± 0,0040	6,75
6	7,5343 ± 0,0176	8,32
7	8,9691 ± 0,0164	-
8	10,517 ± 0,024	11,8
10	13,749 ± 0,082	15,7

EGS4 simülasyonu tasarımı yukarıdaki verilerle doğrulandıktan sonra 200keV, 500keV, 1MeV, 3MeV, 5MeV, 10MeV ve 50MeV enerjili gamalar için etkin atom numarasına bağlı yığılma faktörleri hesaplanmıştır. (Tablo 5-12).

Tablo 5. 200keV enerjili fotonlar için Etkin atom numarası Z_{eff} değerlerine karşılık $\mu_r = 1, 5, 10$ kalınlıklı soğurucularda hesaplanan yığılma faktörleri

(Table 5. For 200keV energetic photons, Buildup factors which were calculated in absorbers with $\mu_r = 1, 5, 10$ thickness versus Z_{eff} values)

Z_{eff}	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	1,5454	3,7682	7,6070
15	1,3735	2,5325	3,9389
20	1,2443	1,8602	2,4223
25	1,3538	2,4282	3,6464
30	1,1082	1,3243	1,4837
35	1,1349	1,4215	1,6342
40	1,0832	1,2498	1,3661
45	1,2073	1,3647	1,4746
50	1,0579	1,1668	1,2351
55	1,0545	1,1570	1,2202
60	1,0496	1,1391	1,1958
65	1,0445	1,1254	1,1751
70	1,0415	1,1167	1,1654

Tablo 6. 500keV enerjili fotonlar için Etkin atom numarası Z_{eff} değerlerine karşılık $\mu_r = 1, 5, 10$ kalınlıklı soğurucularda hesaplanan yığılma faktörleri

(Table 6. For 500keV energetic photons, Buildup factors which were calculated in absorbers with $\mu_r = 1, 5, 10$ thickness versus Z_{eff} values)

Z_{eff}	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	1,7898	5,9515	13,5443
15	1,6649	4,6583	9,7685
20	1,5582	3,7424	6,7142
25	1,6521	4,6695	9,5248
30	1,3834	2,4907	3,6695
35	1,4277	2,7842	4,3131
40	1,3227	2,1988	3,0811
45	1,3239	2,1858	3,0410
50	1,2634	1,8990	2,4570
55	1,2519	1,8538	2,3730
60	1,2345	1,7834	2,2451
65	1,2197	1,7141	2,1267
70	1,2088	1,6461	1,8649

Tablo 7. 1MeV enerjili fotonlar için Etkin atom numarası Z_{eff} değerlerine karşılık $\mu_r = 1, 5, 10$ kalınlıklı soğurucularda hesaplanan yığılma faktörleri

(Table 7. For 1MeV energetic photons, Buildup factors which were calculated in absorbers with $\mu_r = 1, 5, 10$ thickness versus Z_{eff} values)

Z_{eff}	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	1,9957	6,7381	15,1897
15	1,8152	5,7979	11,9022
20	1,7186	4,9428	9,8143
25	1,8145	5,6553	11,5310
30	1,5852	3,7101	6,3419
35	1,6169	4,0393	7,4872
40	1,5110	3,2669	5,3738
45	1,5250	3,3082	5,4213
50	1,4694	2,9067	4,4922
55	1,4519	2,8266	4,3094
60	1,4471	2,7018	3,8189
65	1,4151	2,6070	3,8317
70	1,4050	2,5336	3,6695

Tablo 8. 3MeV enerjili fotonlar için Etkin atom numarası Z_{eff} değerlerine karşılık $\mu_r = 1, 5, 10$ kalınlıklı soğurucularda hesaplanan yığılma faktörleri

(Table 8. For 3MeV energetic photons, Buildup factors which were calculated in absorbers with $\mu_r = 1, 5, 10$ thickness versus Z_{eff} values)

Z_{eff}	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	2,0938	6,6434	12,8137
15	2,0088	6,1527	11,9063
20	1,9264	5,6437	10,8565
25	2,0010	6,1911	12,4250
30	1,7960	4,5779	11,3822
35	1,8331	5,1058	9,9412
40	1,7238	4,3850	9,2222
45	1,7496	4,5374	8,6040
50	2,3043	4,8067	8,4277
55	1,7068	4,2182	8,6157
60	1,6897	4,1661	8,7329
65	1,6644	4,0586	8,4785
70	1,6544	3,9746	8,3661

Tablo 9. 5MeV enerjili fotonlar için Etkin atom numarası Z_{eff} değerlerine karşılık $\mu_r = 1, 5, 10$ kalınlıklı soğurucularda hesaplanan yığılma faktörleri

(Table 9. For 5MeV energetic photons, Buildup factors which were calculated in absorbers with $\mu_r = 1, 5, 10$ thickness versus Z_{eff} values)

Z_{eff}	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	2,1484	6,1704	11,2137
15	2,0662	5,8666	10,9419
20	1,9761	5,4992	10,4626
25	2,0772	6,0887	12,2301
30	1,8434	4,8467	9,3003
35	1,8903	5,1307	10,2910
40	1,7610	4,4447	8,7042
45	1,7871	4,6210	9,2941
50	1,7263	4,3087	8,6445
55	1,7068	4,2182	8,6154
60	1,6925	4,1661	8,7328
65	1,6643	3,9606	6,9053
70	1,6529	3,5245	6,0247

Tablo 10. 10MeV enerjili fotonlar için Etkin atom numarası Z_{eff} değerlerine karşılık $\mu_r = 1, 5, 10$ kalınlıklı soğurucularda hesaplanan yığılma faktörleri

(Table 10. For 10MeV energetic photons, Buildup factors which were calculated in absorbers with $\mu_r = 1, 5, 10$ thickness versus Z_{eff} values)

Z_{eff}	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	2,1385	5,3132	8,9827
15	2,0756	4,9723	9,7832
20	2,0007	4,9246	9,2641
25	2,1653	5,6980	11,7542
30	1,8467	4,4218	8,7381
35	1,9355	4,7831	10,3655
40	1,5051	4,1416	8,6955
45	1,7364	3,9946	8,9919
50	1,7402	4,1653	11,3997
55	1,7350	3,9448	9,1447
60	1,7244	3,9326	9,5290
65	1,7039	3,8306	9,2959
70	1,6940	3,7685	9,2938

Tablo 11. 20MeV enerjili fotonlar için Etkin atom numarası Z_{eff} değerlerine karşılık $\mu_r = 1, 5, 10$ kalınlıklı soğurucularda hesaplanan yığılma faktörleri

(Table 7. For 20MeV energetic photons, Buildup factors which were calculated in absorbers with $\mu_r = 1, 5, 10$ thickness versus Z_{eff} values)

Z_{eff}	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	2,0571	4,3762	7,2428
15	2,0421	4,4204	8,1889
20	1,9805	4,2842	8,4015
25	2,2679	5,1819	11,6971
30	1,8406	3,9086	8,7468
35	1,9935	4,3682	10,9815
40	1,8363	3,7355	9,0388
45	1,8722	3,9216	10,4072
50	1,7932	3,3222	9,8007
55	1,7947	3,6251	10,3121
60	1,8031	3,5395	9,8014
65	1,7854	3,5511	11,1626
70	1,7741	3,5166	11,3309

Tablo 12. 50MeV enerjili fotonlar için Etkin atom numarası Z_{eff} değerlerine karşılık $\mu_r = 1, 5, 10$ kalınlıklı soğurucularda hesaplanan yığılma faktörleri

(Table 12. For 50MeV energetic photons, Buildup factors which were calculated in absorbers with $\mu_r = 1, 5, 10$ thickness versus Z_{eff} values)

Z_{eff}	$\mu_r = 1$	$\mu_r = 5$	$\mu_r = 10$
10	2,0212	3,5788	6,2799
15	2,0862	3,7387	7,4509
20	2,0672	3,6814	7,9202
25	2,5167	4,8809	8,9187
30	1,9347	3,3943	6,9984
35	2,1850	4,9726	10,6981
40	1,9880	3,4108	8,9969
45	2,0284	3,5994	11,0757
50	1,9393	3,3549	10,9868
55	1,9639	3,3702	11,0689
60	1,9707	3,4148	12,0901
65	1,9596	3,3659	11,9845
70	1,9659	3,3447	11,9705

Soğurucu ortamın etkin atom numarası ile yığılma faktörlerinin değişimini içeren bu ölçekte başka bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışma ile bu alanda detaylı bir veri sunulmaktadır. 200keV, 500keV, 1MeV, 5MeV, 10MeV ve 50MeV için yığılma faktörleri Z_{eff} in bir fonksiyonu olarak farklı etkileşim derinlikleri için tablolar halinde verilmiştir (Tablo 5-12). Elde sonuçların Mersinoğlu'nun[8] verileri ile uyumlu olduğu gözlenmiştir. Sığ etkileşim derinliklerinde yığılma faktörleri artan Z değerlerine karşın düzgün bir değişim (azalma) göstermektedir fakat derin etkileşim değerlerinde bu değişim daha keskin ve hızlıdır. Ayrıca düşük Z değerleri ($Z_{eff} \leq 35$) için maruz kalma yığılma faktörleri ani dalgalanmalar göstermektedir. Bunun nedeni düşük enerjili Compton saçılmalarıdır. Fotoelektrik soğurma toplam saçılan fotonlarla kıyaslanır düzeydedir, fakat hafif elementler (küçük Z değerli) için enerji akısı, düşük enerjili saçılmalardan kaynaklanacak yüksek pikleri engellemektedir. Derin

etkileşimlerde azalan atom numarasına karşı, çoklu foton saçılmalarının pik etkisi azalmaktadır. Küçük Z değerleri ($Z_{eff} \leq 35$) için, düşük enerjili ikincil parçacıkların sayısı fotoelektrik etkileşimlerin sayısına kıyasla bir artış göstermektedir. Bu da yığılma faktörlerinin değişiminde yüksek dalgalanmalara sebep olmaktadır. Bu çalışmada $\mu=1, 5, 10$ değerler için yığılma faktörleri küçük etkin atom numaralarına karşın ani değişimler sergilemektedir. Yığılma faktörlerinin tek element ve karışımlar için karşılaştırılmasında, aynı değeri karşılayan Z ve Z_{eff} için farklar ortaya çıkmaktadır. Örneğin atom numarası 56 olan demir elementi için 5mfp kalınlıkta ve 1 Mev enerjide $B=6,1$ dir, fakat $Z_{eff}=56$ olan bir karışım için bu değer 2,8 olmaktadır. Çalışma ile elde edilen verilerinin literatür ile uyumlu olduğu gözlenmiştir (Tablo 4). Karışımlara ait veri düzgün bir dağılım göstermemektedir. Farklı etkin atom numaralarının elde edilmesinde aynı element grubunun farklı kesirleri kullanılmıştır. Seçilecek belirli bir Z_{eff} değeri için birden fazla karışım oranı kombinasyonu mümkündür. Bu, yığılma faktörlerinin doğrudan soğurucu malzemenin etkin atom numarasına bağlı olmadığını göstermektedir. Karışım olan bir soğurucu ortama gelen radyasyon ortamı oluşturan farklı elementlerden birini atomu ile etkileşecektir. etkileşimin karakteristiğini karışımın özellikleri değil atomların elementer özellikleri belirleyecektir. Her ne kadar etkin atom numarası doğrudan belirleyici olarak görünmese de ortalama serbest yol uzunluklarını doğrudan belirlemektedir. Etkileşim mesafeleri yığılma faktörlerinde etkin bir parametredir, bu nedenle yığılma faktörlerinin etkin atom numarasına önemli bir bağlılığından bahsedilebilir. Bu değişim değerlendirilirken karışım içindeki farklı elementlerin istatistikî ağırlıkları göz önünde bulundurulmalıdır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Taylor, J.J., (1954). Application of gamma ray buildup data to shield design, WAPD-RM-217
2. Berger, M.J., (1956). Effect of Boundaries and Inhomogeneities on the Penetration of Gamma Radiation, Report NBS-4942, U.S. National Bureau of Standards Washington D. C.,
3. Metghalchi, M., (1979). On the Polynomial Form of Gamma-Ray Buildup Factor Functions, Nucl. Sci. Eng. 70, 207
4. Nelson, W.R., Hirayama, H., and Rogers, D.W.O., (1985). The EGS4 Code System, SLAC-265, Stanford Linear Accelerator Center.
5. Akinao, S., (2000). Development of Angular Eigenvalue Method for Deep Penetration problems of Gamma Rays, The Wakasawan Energy Research Center, Journal of Nuclear Science and Technology, Supplement 1, Pp:454-458
6. Storm, E. and Israel, H. I., (1970). Photon Cross Section from 1 keV to 100 MeV for Elements Z=1 to Z= 100, At. Data Nucl. Data Tables, 7, 565
7. Hubbel, J., (1969). Photon Cross Section, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV," NSRDS-NBS 29, National Bureau of Standards
8. Mersinlioğlu, Ö., (1986). Gamma Işınlara Ait Sayısal Yığılma Faktörlerinin Soğurucunun Atom Numarasına Göre Değişiminin İncelenmesi Ms.C. Thesis, Ege University, Turkey.